

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ КОНТАКТА МЕТОДОМ СПЕКЛ-ФОТОГРАФИИ

*А. В. Осинцев, Ю. И. Островский, В. П. Щепинов, В. В. Яковлев*

Точные решения задач теории упругости и пластичности существуют лишь для случая контакта тел, имеющих правильную геометрическую форму, и в предположении, что поверхности их являются абсолютно гладкими. Поэтому при исследовании контакта тел неправильной формы с шероховатыми поверхностями значительное место отводится экспериментальным методам [1].

Для определения границы поверхности контакта и распределения контактных давлений по поверхности контакта в случае тел с шероховатыми поверхностями в последнее время используется голографическая интерферометрия в полосах конечной ширины [2-4]. В основу этих методов положена связь между изменением микрорельефа поверхности в зоне контакта и контрастом интерференционных полос. Изменение микрорельефа приводит к частичной или полной декорреляции восстановленных с помощью голограммы световых волн, и, как

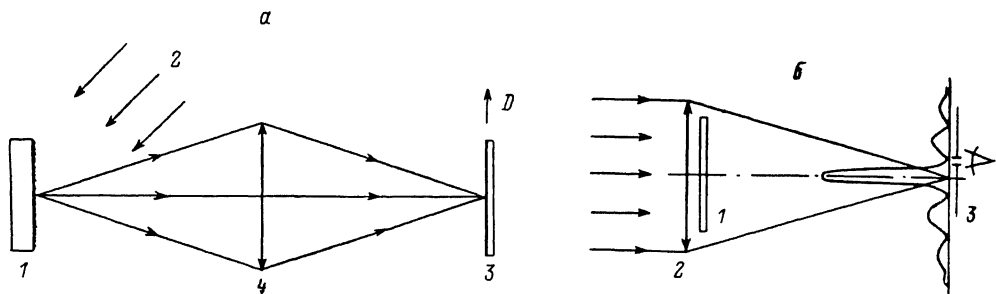


Рис. 1. Оптические схемы регистрации спекл-фотографий (а) и вычитания изображений (б).

следствие этого, контраст интерференционных полос уменьшается вплоть до их полного исчезновения. Ограничением описанного в работе [3] метода визуализации зоны контакта является то, что граница поверхности контакта определяется в виде набора дискретных точек, расстояние между которыми зависит от шага интерференционных полос. Это обстоятельство вызывает затруднения при регистрации поверхности контакта малых размеров. Кроме того, замечено, что при увеличении твердости контактирующих тел полного исчезновения интерференционных полос в зоне контакта не наблюдается. Определение границы поверхности контакта в этом случае возможно через минимально измеримое падение контраста и является трудоемкой операцией.

В настоящей работе рассматривается методика получения непрерывной границы зоны контакта на плоской поверхности тела, основанная на вычитании изображений с помощью метода спекл-фотографии.

Предлагаемая методика основывается на том, что изменение микрорельефа поверхности в области контакта приводит к декорреляции спекл-структур на изображении исследуемого участка поверхности тела. Визуализация области декорреляции спекл-структур осуществляется с помощью метода вычитания изображений, описанного в работе [5].

Исследуемая область тела с плоской поверхностью 1, освещаемая когерентным светом от лазера 2, проецируется на фотопластинку 3 с помощью объектива 4 (рис. 1, а). При первой экспозиции на фотопластинке регистрируется изображение поверхности тела в исходном состоянии. Затем осуществляется контактное взаимодействие тел, фотопластинка смещается в своей плоскости на величину  $D$  и производится второе экспонирование.

После фотографической обработки спекл-фотография 1 устанавливается за линзой 2 в оптической схеме пространственной фильтрации (рис. 1, б). В результате смещения фотопластинки распределение интенсивности в фокальной плоскости линзы (Фурье-плоскости) будет промодулировано параллельными интерференционными полосами. Если теперь расположить в Фурье-плоскости узкую щель 3, ось которой совмещена с центром темной полосы, то наблюдаемое через нее изображение объекта будет темным, за исключением области кон-

такта. Это обусловлено тем, что спекл-структуры, соответствующие этому участку изображения, являются декоррелированными.

Декорреляция спекл-структур на дважды экспонированной спекл-фотографии происходит быстрее, чем вызванная тем же изменением микроструктуры поверхности декорреляция волн, восстановленных с дважды экспонированной голограммы. Этим и вызвана боль-

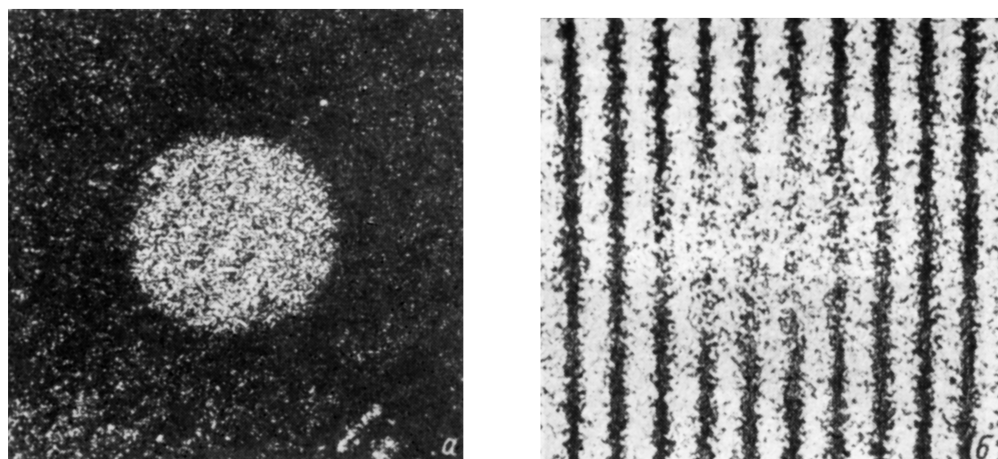


Рис. 2. Граница поверхности контакта при нагрузке 150 кН, зарегистрированная методом спекл-фотографии (а) и голографической интерферометрии (б).

шая чувствительность метода спекл-фотографии по сравнению с методом голографической интерферометрии. Благодаря этому границы зоны контакта на спекл-фотографии определяются более четко.

Проверка методики проводилась при исследовании контакта стальной сферы радиусом 500 мм с плоскостью стальной плиты. Твердости контактируемых тел были близки и составляли 44 и 39 единиц НРС соответственно. Шероховатости обеих поверхностей были одинаковы  $R_a=1.5$  мкм. На рис. 2, а представлена фотография поверхности контакта, полученная

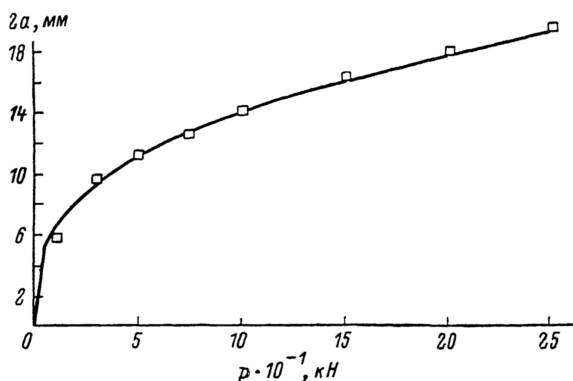


Рис. 3. Зависимость диаметра пятна контакта  $2a$  от нагрузки  $P$ .

с помощью рассмотренной методики. Одновременно со спекл-фотографией регистрировалась голографическая интерферограмма в полосах конечной ширины по методике, описанной в работе [3]. Для этого в оптической схеме (рис. 1, а) голограмма располагалась перед объективом 4. Порядок экспонирования голограммы и спекл-фотографии в этом случае следующий.

На спекл-фотографии регистрировалось изображение исходного состояния исследуемой поверхности тела (1-я экспозиция спекл-фотографии), после чего спекл-фотография закрывалась маской.

Устанавливалась фотопластинка для регистрации голограммы и осуществлялось ее экспонирование (1-я экспозиция голограммы).

Исследуемый объект вводился в силовой контакт с другим телом и поворачивался на малый угол относительно оси, лежащей в плоскости его поверхности, после чего производилось экспонирование голограммы (2-я экспозиция голограммы) и она удалялась из схемы.

Маска, закрывающая фотопластинку для регистрации спекл-фотографии, убиралась, фотопластинка смещалась на величину  $D$  в своей плоскости и производилось ее экспонирование (2-я экспозиция спекл-фотографии).

На рис. 2, б приведена голографическая интерферограмма в полосах конечной ширины, полученная при той же ступени нагружения, что и поверхность контакта, визуализированная с помощью метода спекл-фотографии (рис. 2, а). Видно, что контраст интерференционных полос в зоне контакта уменьшается по мере приближения к центру, но полностью интерференционные полосы не исчезают.

На рис. 3 точками показана зависимость диаметра пятна контакта, измеренная методом спекл-фотографии, от нагрузки, а сплошной линией — зависимость, найденная из реше-

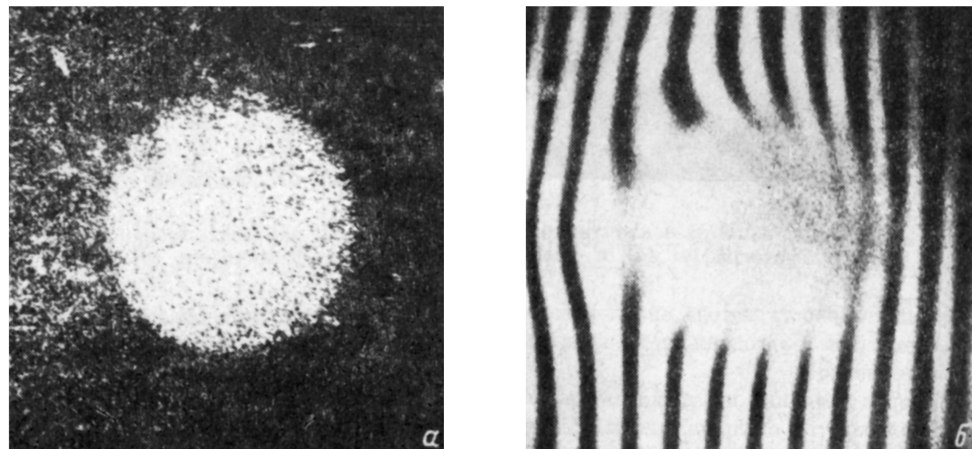


Рис. 4. Граница поверхности контакта (а) и интерферограмма в полосах конечной ширины (б), полученные с помощью одной голограммы сфокусированных изображений.

ния задачи Герца [8]. Несмотря на то что это решение предусматривает гладкие поверхности контактирующих тел, совпадение результатов можно объяснить тем, что высота микронеровностей существенно меньше величины поверхности контакта.

Погрешность измерения поверхности контакта в рассматриваемом методе зависит в основном от размеров спеклов (рис. 2, а), и, как показывают оценки, она не превышает величины 4 %. Для уменьшения размеров спеклов необходимо увеличить ширину щели и, следовательно, ширину темных интерференционных полос в Фурье-плоскости. Это может достигаться за счет использования многоэкспозиционной спекл-фотографии [7].

Используя схемы с увеличением, представляется возможным зарегистрировать поверхность контакта не менее 0.5 мм.

Высокая точность, с которой методом голографической интерферометрии регистрируется граница перехода в область упругопластического деформирования при контакте двух тел [3], и возможность регистрации непрерывной границы поверхности контакта на основе использования метода спекл-фотографии могут быть объединены в оптической схеме получения голограмм сфокусированных изображений. На рис. 4 показаны фотография поверхности контакта, полученная методом спекл-фотографии (а), и голографическая интерферограмма в полосах конечной ширины (б). Информация получена с одной дважды экспонированной голограммы сфокусированных изображений для случая контакта сферы с плоскостью. Между экспозициями исследуемое тело поворачивалось на малый угол вокруг оси, лежащей в плоскости его поверхности, и фотопластинка смещалась на величину  $D$  в своей плоскости. Искривление интерференционных полос (рис. 4, б) свидетельствует о появлении остаточной деформации в зоне контакта, и, следовательно, при данной нагрузке контакт тел упругопластический.

Рассмотренная методика позволяет визуализировать непрерывную границу контакта

для тел с квазиплоской поверхностью, а совместное применение ее с методом голографической интерферометрии в рамках голографии сфокусированных изображений позволяет определить характер контакта.

### Литература

- [1] Демкин Н. Б. Контактное шероховатых поверхностей. М.: Наука, 1970. 277 с.
- [2] Atkinson J. T., Lalor M. J. Application of holography and optical data processing. /Eds. E. Marom, A. A. Frisem, 1976, p. 289—298.
- [3] Шепинов В. П., Морозов Б. А., Новиков С. А., Аистов В. С. ЖТФ, 1980, т. 50, № 9, с. 1926—1928.
- [4] Осинцев А. В., Островский Ю. И., Шепинов В. П., Яковлев В. В. Письма в ЖТФ, 1985, т. 11, № 4, с. 202—204.
- [5] Debrus S., Françon M., Grover C. P. Opt. Commun., 1971, v. 4, N 2, p. 172—174.
- [6] Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1975. 576 с.
- [7] Debrus S., Françon M., Grover C. P. Opt. Commun., 1972, v. 6, N 1, p. 15—17.

Московский  
инженерно-физический институт

Поступило в Редакцию  
27 апреля 1987 г.

УДК 534.533.7

Журнал технической физики, т. 58, в. 7, 1988

## РАДИАЦИОННЫЕ ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОНАМИ В ОРИЕНТИРОВАННЫХ МИШНЯХ

С. В. Игнатьев, В. А. Муралева

В последние годы ведутся интенсивные исследования нового физического эффекта, впервые предсказанного в работе [1] и являющегося следствием прохождения легких заряженных частиц через ориентированные мишени вдоль плоскостных или осевых направлений. Задачи, решаемые здесь, носят не только фундаментальное, но и важное прикладное значение. В настоящее время наиболее интенсивно развиваются два подхода к вышеуказанным задачам: кинетическое приближение [2—4] и метод численного эксперимента (см., например, [5, 6]), плодотворно дополняющие друг друга.

В данной работе методом моделирования траекторий частиц на ЭВМ для осевого направления рассчитаны удельные потери энергии на излучение в области энергий электронов от 100 МэВ до 10 ГэВ. Потенциал оси получен из потенциала Томаса—Ферми с мольеровской функцией экранирования усреднением вдоль оси и по тепловым колебаниям атомов цепочки. Канализирующие частицы излучают вследствие движения в поле с отличным от нуля градиентом потенциала, который задает напряженность электрического поля цепочки, полученной в численном виде из потенциала атомной оси. Разыгрывались параметры удара  $p$  и углы падения частиц  $\theta$  по отношению к оси. При этом отбирались только те частицы, которые движутся в связанном состоянии с атомной осью. Усредняя по прицельным параметрам и углам входа, получаем удельные потери на излучение. Проводится сравнение с результатами расчетов в кинетическом приближении [7, с. 125; 8, 9] и с экспериментом [10].

### 1. Градиенты и потенциалы взаимодействия атомных осей

Потенциал взаимодействия отрицательно заряженных частиц (электронов) с атомной осью после усреднения по оси и по тепловым колебаниям атомов цепочки может быть представлен в виде [11]

$$U_T(\rho) = -\frac{Z_2 e^2}{d_s} \sum_{i=1}^3 \alpha_i \exp(q_i^2) \int_0^1 \exp\left(-\frac{\rho^2 t}{u_1^2} - \frac{q_i^2}{t}\right) \frac{dt}{t}, \quad (1)$$

где  $Z_2 e$  — заряд ядер атомов мишени;  $\{\alpha_i\} = \{0.1, 0.55, 0.35\}$ ;  $d_s$  — среднее расстояние между ближайшими атомами оси;  $u_1^2$  — квадрат амплитуды тепловых колебаний в пло-